

A Study on the Development of BLDC Motor with High Power Density

金賢哲* · 孔泳卿** · 崔泰仁*** · 宋鍾煥§
 (Hyun-Cheol Kim · Yeong-Kyung Kong · Tae-In Choi · Jong-Hwan Song)

Abstract - The motor for torpedo propulsion is needed the compact and short rating high power characteristics. This paper describes the development of the motor through the theory and Finite Element Method(FEM) analysis for Brushless Direct Current Motor(BLDCM) of 7 phase 6 poles. Back EMF, inductance and eddy current loss were analyzed. The proposed methods like magnetic wedge acquired by these FEM analysis were introduced. Phase-leading angle using encoder was used. Test results on the motor of 7 phases 6 poles were showed the validity of proposed methods and phase-leading angle.

Key Words : brushless DC motor, back EMF, phase-leading angle

1. 서 론

어뢰용으로 사용되고 있는 전동기는 적용체계의 특성으로 인하여 단시간 고출력 특성을 가지고 있으며 제한된 공간상의 제약으로 인한 탑재 전동기의 소형화가 필수적인 특성을 가지고 있다. 이러한 어뢰용 전동기는 그 기술적 특성에 대해서는 거의 알려지지 않고 있어 개발 시 많은 어려움을 겪고 있다. 그런 가운데 적용 대상을 중심으로 한 사양만 공개되고 있는 실정이며, 1970년대 이전에는 직류전동기가 독일의 SUT어뢰, 미국의 MK37어뢰, 영국의 Sting Ray어뢰 등에 적용되어 오다가 1980년대부터 브러시리스 직류전동기가 개발되기 시작하여 1990년대에 이르러 브러시리스 직류전동기가 적용되고 있으며[1][2], 최근에 와서는 그 이전 전동기 보다 고출력화된 영구자석형 전동기가 2000년대 초 독일의 DM2A4어뢰에 적용을 위한 개발이 진행중에 있다[3].

이러한 개발 추세는 전체적으로 소형 경량화 및 고출력에너지 밀도화로 요약될 수 있으며, 이것은 곧 1970년대에는 중량 당 출력비가 1.0[kW/Kg] 정도이던 것이, 1980년대에는 1.7 정도, 1990년대에는 2.1정도, 최근에 와서는 약 3.0을 넘는 추세로 진행되고 있다[2]. 이런 추세는 급속히 발전되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 가장 최근에 개발되어 어뢰에 적용되고 있는 3.0[kW/Kg] 수준의 고출력 에너지 밀도를 가지는 7상 6극 브러시리스 직류전동기 개발과 관련된 기술들로서 이론식 정립, 유한요소해석을 이용하여 공극자속밀도, 인덕턴스, 역기전력 및 와전류 손실 해석을 토대로 역기전력 크기 개

선, 파형 개선, 자성웨지 적용 및 엔코더 진상각 적용 등을 통하여 주어진 요구조건을 만족하는 결과를 얻어 고출력 브러시리스 직류전동기를 개발하게 된 내용을 다루고 있다.

2. 7상 6극 BLDCM 해석 식 유도[4]

2.1 기자력 식

1상의 권선을 N_s 라 두고, 이 권선이 고정자에 정현적으로 분포되어 있다고 하면, $\theta = \theta_s$ 위치에서 1상(a상) 전류에 의해 만들어진 기자력(MMF)은 식 (1)과 같다.

$$MMF_{\omega}(\theta_s) = \frac{N_s}{2} i_{\omega} \cos \theta_s \quad (1)$$

다른 2상(b상)으로부터 7상(g상)에 대한 MMF 역시 식(2)로부터 (7)과 같이 표현되어 진다.

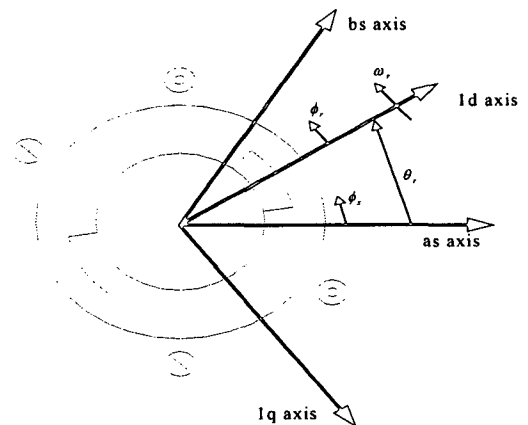


그림 1 7상 6극 BLDCM 모델
 Fig. 1 Model of BLDCM with 7 phases and 6 pole

* 正 會 員 : 國防科學研究所 先任研究員
 ** 正 會 員 : 國防科學研究所 責任研究員 · 工博
 *** 正 會 員 : 國防科學研究所 責任研究員 · 工博
 § 正 會 員 : (株)曉星 首席研究員 · 工博
 接受日字 : 1999年 10月 19日
 最終完了 : 2000年 4月 10日

$$MMF_{bs}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} i_{bs} \cos(\varphi_s - \frac{2}{7}\pi) \quad (2)$$

$$MMF_{cs}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} i_{cs} \cos(\varphi_s - 2\frac{2}{7}\pi) \quad (3)$$

$$MMF_{ds}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} i_{ds} \cos(\varphi_s - 3\frac{2}{7}\pi) \quad (4)$$

$$MMF_{es}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} i_{es} \cos(\varphi_s - 4\frac{2}{7}\pi) \quad (5)$$

$$MMF_{fs}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} i_{fs} \cos(\varphi_s - 5\frac{2}{7}\pi) \quad (6)$$

$$MMF_{gs}(\varphi_s) = \frac{N_s}{2} i_{gs} \cos(\varphi_s - 6\frac{2}{7}\pi) \quad (7)$$

2.2 공극자속밀도 식

본 7상 전동기는 비돌극(non-salient) 구조이므로 공극의 길이 g는 모든 면에서 동일하며 한 상(phase)의 고정자에 의해 발생된 자속밀도는 다음과 같이 표현된다.

$$B_{as}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{MMF_{as}(\varphi_s)}{g} \quad (8)$$

$$= \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{as}}{g} \cos \varphi_s$$

다른 상에 대해서도 동일하게 적용하면 아래와 같다.

$$B_{bs}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{bs}}{g} \cos(\varphi_s - \frac{2\pi}{7}) \quad (9)$$

$$B_{cs}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{cs}}{g} \cos(\varphi_s - 2 \cdot \frac{2\pi}{7}) \quad (10)$$

$$B_{ds}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{ds}}{g} \cos(\varphi_s - 3 \cdot \frac{2\pi}{7}) \quad (11)$$

$$B_{es}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{es}}{g} \cos(\varphi_s - 4 \cdot \frac{2\pi}{7}) \quad (12)$$

$$B_{fs}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{fs}}{g} \cos(\varphi_s - 5 \cdot \frac{2\pi}{7}) \quad (13)$$

$$B_{gs}(\varphi_s) = \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{gs}}{g} \cos(\varphi_s - 6 \cdot \frac{2\pi}{7}) \quad (14)$$

회전자에는 영구자석이 있으며 이 자석에 의한 효과는 정전류원과 동일하며, 공극에서의 회전자의 영구자석에 의한 자속밀도는 다음과 같다.

$$B_{1r}(\varphi_r) = B_m \cdot \cos \varphi_r \quad (15)$$

2.3 합성자속 및 인덕턴스 식

$$\lambda_{as,as} = L_k \cdot i_{as} + \int N_{as}(\varphi_s) \cdot \Phi_{as}(\varphi_s) d\varphi_s$$

$$= L_k \cdot i_{as} - \int_{\pi}^{2\pi} \frac{N_s}{2} \sin \varphi_s \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \pi} \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{as}}{g} \cdot \cos \varphi_s \cdot rl d\xi d\varphi_s$$

$$= L_k \cdot i_{as} + \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \cdot \frac{i_{as}}{g} \quad (16)$$

그런데 $\lambda_{as,as} = L_{as,as} \cdot i_{as}$ 이므로, 자기 인덕턴스 $L_{as,as}$ 는 다음과 같이 된다.

$$L_{as,as} = L_k + \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \cdot \frac{1}{g} \quad (17)$$

a-b 상간의 상호 인덕턴스를 얻기 위해 b상에 의해 유기되는 합성자속 $\lambda_{as,bs}$ 를 구하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\lambda_{as,bs} = \int N_{as}(\varphi_s) \cdot \Phi_{bs}(\varphi_s) d\varphi_s$$

$$= - \int_{\pi}^{2\pi} \frac{N_s}{2} \sin \varphi_s \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \pi} \mu_0 \frac{N_s}{2} \cdot \frac{i_{bs}}{g} \cdot \cos(\xi - \frac{2\pi}{7}) \cdot rl d\xi d\varphi_s$$

$$= \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{7}\right) \cdot \frac{i_{bs}}{g} \quad (18)$$

따라서 상호 인덕턴스 $L_{as,bs}$ 는 다음과 같다.

$$L_{as,bs} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \frac{1}{g} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{7}\right) \quad (19)$$

a상에 의한 b상의 상호 인덕턴스 $L_{bs,as}$ 는 두 권선 a와 b가 서로 대칭적이므로 $L_{bs,as} = L_{as,bs}$ 임을 알 수 있다. 다른 상(c,d,e,f,g)에 대해서도 동일한 이론을 적용하여 정리하면 다음의 일련의 식을 얻을 수 있다.

$$L_{as,cs} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \frac{1}{g} \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (20)$$

$$L_{as,ds} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \frac{1}{g} \cdot \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (21)$$

$$L_{as,es} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \frac{1}{g} \cdot \cos\left(4 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (22)$$

$$L_{as,fs} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \frac{1}{g} \cdot \cos\left(5 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (23)$$

$$L_{as,gs} = \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \pi \mu_0 rl \frac{1}{g} \cdot \cos\left(6 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (24)$$

회전자 자석에 의해 고정자 권선에 쇄교되는 자속으로 인한 합성자속은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\lambda_{as,1r} = \int N_{as}(\varphi_s) \cdot \Phi_{1r}(\varphi_s) d\varphi_s$$

$$= \int_{\pi}^{2\pi} \frac{N_s}{2} \sin \varphi_s \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \pi} B_m \cdot \cos(\xi + \theta_r) \cdot rl d\xi d\varphi_s$$

$$= - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos \theta_r \quad (25)$$

고정자의 다른 상(b...g)에 대해서도 동일한 과정을 적용하면 다음과 같다.

$$\lambda_{bs,1r} = \int N_{bs}(\varphi_s) \cdot \Phi_{1r}(\varphi_s) d\varphi_s$$

$$= \int_{\pi}^{2\pi} \frac{N_s}{2} \sin \varphi_s \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \pi} B_m \cdot \cos\left(\xi - 2\frac{\pi}{7} + \theta_r\right) \cdot rl d\xi d\varphi_s$$

$$= - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{7}\right) \quad (26)$$

$$\lambda_{cs,1r} = - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos\left(\theta_r - 2 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (27)$$

$$\lambda_{ds,1r} = - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos\left(\theta_r - 3 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (28)$$

$$\lambda_{es,1r} = - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos\left(\theta_r - 4 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (29)$$

$$\lambda_{fs,1r} = - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos\left(\theta_r - 5 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (30)$$

$$\lambda_{gs,1r} = - \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi rl B_m \cdot \cos\left(\theta_r - 6 \cdot \frac{2\pi}{7}\right) \quad (31)$$

한편, 영구자석으로 구성되어 있는 회전자는 정전류원으로 생각할 수 있으므로 고정자 권선에 의한 회전자 내의 쇄교 자속은 고려할 필요가 없다.

2.4 전압 및 토크 방정식

회전자에 N-S극 1쌍의 영구자석이 있다고 가정하면, 고정자 각 상에서의 전압방정식은 식(32)와 같이 나타내어진다.

$$v_{is} = r_s \cdot i_{is} + \frac{d\lambda_{is}}{dt} \quad (i = a, b, \dots, g) \quad (32)$$

$$\lambda_{is} = \sum_{j=a}^g (L_{is,js} \cdot i_{js}) + \lambda_{is,lr} \quad (i = a, b, \dots, g)$$

$$L_{is,js} = L_b + \left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi\mu_0 lr}{g} \quad (i=j)$$

$$\left(\frac{N_s}{2}\right)^2 \frac{\pi\mu_0 lr}{g} \cos\left((i-j)\frac{2\pi}{7}\right) \quad (i \neq j)$$

여기서,

λ_{is} : 쇄교자속

$L_{is,js}$: $i=j$ 시 자기 인덕턴스

$i \neq j$ 시 상호 인덕턴스

L_{is}, i_{js} : 상호 권선에 의해 만들어 지는 쇄교 자속

$\lambda_{is,lr}$: 영구자석에 의해 만들어 지는 쇄교 자속

L_b : 누설 인덕턴스

N_s : 고정자 한 상의 권선수

μ_0 : 공극 투자율

g : 공극

l : 회전자의 축 방향 길이

r : 고정자 내경

또한 토크 방정식의 일반식은 식(33)과 같다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left\{ -\frac{1}{2} (i_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} [L_s - L_b] i_s + (i_s)^T \frac{\partial}{\partial \theta_r} \Lambda_{sr} \right\} \quad (33)$$

$$\Lambda_{sr}^T = -\lambda_m \left[\cos \theta_r \cos(\theta_r - \gamma) \cos(\theta_r - 2\gamma) \cos(\theta_r - 3\gamma) \right. \\ \left. \cos(\theta_r - 4\gamma) \cos(\theta_r - 5\gamma) \cos(\theta_r - 6\gamma) \right]$$

$$\lambda_m = \left(\frac{N_s}{2}\right) \pi r l B_m, \quad \gamma = \frac{2\pi}{7}, \quad P : \text{극수}$$

표면부착형 영구자석 전동기에서는 토크 성분은 나타나지 않는다. 즉 (33)식의 첫 번째 항은 무시할 수 있다. 따라서 식(33)은 식(34)와 같이 정리된다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \lambda_m \{ i_{as} \sin \theta_r + i_{bs} \sin(\theta_r - \gamma) + i_{cs} \sin(\theta_r - 2\gamma) \\ + i_{ds} \sin(\theta_r - 3\gamma) + i_{es} \sin(\theta_r - 4\gamma) \\ + i_{fs} \sin(\theta_r - 5\gamma) + i_{gs} \sin(\theta_r - 6\gamma) \} \quad (34)$$

키르히호프의 전류법칙으로부터 7상 입력전류의 합은 0이어야 한다. 따라서 본 시스템의 전류제어 방법으로서 7상 중 6상에는 구형파 전압이 인가되고, 나머지 1상은 전류(轉流)를 위한 여유시간을 갖도록 하였다.

즉, $-\frac{\pi}{7} \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{7}$ 구간에서의 입력전류는 다음과 같다.

$$i_{as} = 0$$

$$i_{bs} = i_{cs} = i_{ds} = -I_s$$

$$i_{es} = i_{fs} = i_{gs} = I_s$$

이것은 토크 식(34)에 대입하면 식(35)와 같이 얻어진다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) \lambda_m I_s \{ -\sin(\theta_r - \gamma) - \sin(\theta_r - 2\gamma) \\ - \sin(\theta_r - 3\gamma) + \sin(\theta_r - 4\gamma) \\ + \sin(\theta_r - 5\gamma) + \sin(\theta_r - 6\gamma) \} \quad (35)$$

$$= \left(\frac{P}{2}\right) 2\lambda_m I_s \cos \theta_r (\sin \gamma + \sin 2\gamma + \sin 3\gamma)$$

$\gamma = \frac{2}{7} \pi$ 이므로 이를 식(35)에 적용하면 식(36)과 같이 정리된다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2}\right) 4.3812 \lambda_m I_s \cos \theta_r \quad (36)$$

본 전동기는 회전자 자석이 6극 이므로 식(37)과 같이 된다.

$$T_e = 13.1436 \lambda_m I_s \cos \theta_r, \quad \left(-\frac{\pi}{7} \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{7}\right) \quad (37)$$

식(37)의 토크 식은 전동기 설계에 이용하였다.

3. 유한요소 해석

3.1 지배방정식 및 공극자속밀도

변위전류를 무시한 Maxwell의 전자계 방정식 및 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e \quad (38)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (39)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (40)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (41)$$

$$\vec{J}_e = \alpha (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (42)$$

여기서, \vec{H} : 자계의 세기 [A/m]

\vec{B} : 자속밀도 [T]

\vec{J}_0 : 강제전류밀도 [A/m²]

μ : 재료의 투자율 [H/m]

식(38)에 의해서 자속의 발산은 항상 0이 되므로 식(43)과 같은 자기벡터포텐셜 \vec{A} 가 정의된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (43)$$

식(38), (43)으로부터 식(44)가 구해진다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e \\ = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) \quad (44)$$

또한, 식(44)는 벡터 공식으로부터 식(45)와 같이 구해진다.

$$\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \vec{A} \right) - \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \vec{A} = \vec{J}_0 + \vec{J}_e \quad (45)$$

식(45)에 Coulomb gauge 조건 $\nabla \cdot \vec{A} = 0$ 을 적용하면 자기벡터 포텐셜 \vec{A} 로 나타내어 지는 Poisson 방정식 (46)을 얻을 수 있다.

$$\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \vec{A} = -\vec{J}_0 + \alpha \left(\frac{d\vec{A}}{dt} + \nabla \phi \right) \quad (46)$$

BLDCM의 고정자 권선에 흐르는 전류는 z축 방향으로만 흐른다고 가정하면 식(46)은 2차원 직각좌표계에서 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0 + \sigma \left(\frac{dA}{dt} + \frac{d\phi}{dz} \right) \quad (47)$$

여기서, μ 는 자기투자율, A와 J_0 는 자기벡터포텐셜 \vec{A} 및 강제전류밀도 \vec{J}_0 의 z축 방향성분을 나타낸다.

식(47)을 해석영역에 대하여 유한요소로 이산화하여 해를 구하고[5] 이로부터 공극자속밀도를 계산할 수 있다.

그림 2는 BLDCM의 해석 모델로서 1극에 대한 그림이다.

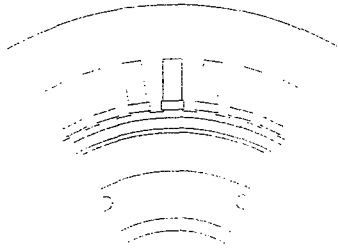


그림 2 BLDCM의 해석 모델
Fig. 2 Analysis model of BLDCM

그림 3은 BLDCM의 1극당 공극자속밀도이다.

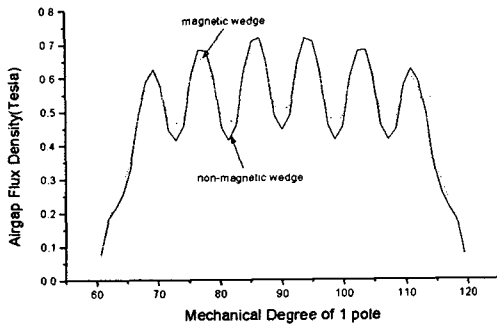


그림 3 BLDCM의 1극당 공극자속밀도 해석
Fig. 3 Analysis of air gap flux density for 1 pole of BLDCM

3.2 인덕턴스

인덕턴스를 구하기 위한 자속과 쇄교자속량은 식(48), (49)로 표현할 수 있다.

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (48)$$

2차원 해석시 식(49)과 같이 구한다[6].

$$\lambda = (A_1 - A_2) \cdot l \cdot T \quad (49)$$

여기서 A_1 : +z 방향 코일변의 벡터 포텐셜의 평균값

A_2 : -z 방향 코일변의 벡터 포텐셜의 평균값

l : z 방향의 길이(전동기 철심장)

T : 슬롯 당 턴수

식(49)로부터 구한 쇄교자속량을 이용하여 다음과 같이 인덕턴스를 구한다.

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (50)$$

본 연구 대상인 BLDCM의 인덕턴스를 구하는 목적은 80%의 목표성능을 달성한 전동기의 선간 인덕턴스가 70[μ H]이 되어 16[μ sec] 당 리플 200[A]이 되고 평균 전류가 약 100[A]이 되었다. 이는 선간 인덕턴스가 낮아서 전동기의 토크를 만드는 전기자 상전류의 크기가 적고 리플 전류의 첨두 전류가 커지게 된다. 따라서 선간 인덕턴스의 크기를 적정한 크기로 향상시킬 필요가 있다. 개선될 인덕턴스의 값은 108[μ H]로서 50[μ sec] 당 리플 전류 100[A]이 되고 평균 전류가 약 150[A]이 되었다.

인덕턴스를 향상시키는 방법으로는

- 1) 회전자 구조 및 공극 길이 변경
- 2) 전기회로 설계 변경
- 3) 자성웨이 사용
- 4) 고정자 단절권에서 전절권으로 변경

기준에 설계/제작된 것과 비교 검토한 결과 3), 4)를 채택하여 적용함이 바람직한 것으로 판단하였다.

표 1에 인덕턴스 해석 결과 값을 나타내고 있다. 그 중에 2안이 다음과 같은 장점을 가지고 있어 채택 적용하였다.

- 1) 역기전력이 좀 더 사각파에 가까움
- 2) 저항의 변화 없이 인덕턴스만 증가시키므로 전류 리플 감소에 효과적임
- 3) 와전류에 의한 손실 감소시킴

표 1 인덕턴스 해석 결과

Table 1 Analysis results of inductance

	기준	1안	2안
권선절	단절	단절	전절
권선 턴수	2	2	2
자성웨이	없음	Magnoval 2232	Magnoval 2232
공극	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm
타타늄	2.5 mm	2.0 mm	2.5 mm
구리밴드	-	1.0 mm	1.0 mm
자석두께	9.5 mm	9.5 mm	9.0 mm
자석길이	94 mm	94 mm	88 mm
철심장	102 mm	102 mm	102 mm
회전자의경	74 mm	74 mm	74 mm
인덕턴스	70 μ H	91 μ H	101 μ H
역기전력	171 V	174 V	145 V

3.3 역기전력

시간 t 에서 BLDCM에 유기되는 상전압은 다음과 같이 각 상 쇄교자속의 시간미분으로 정의할 수 있다.

$$V_a(t) = - \frac{d\lambda_a(t)}{dt} \quad (51)$$

위 식의 시간미분항을 후퇴차분으로 근사시키면 식(52)와 같다.

$$V_a(t + \Delta t) = - \frac{\lambda_a(t + \Delta t) - \lambda_a(t)}{\Delta t} \quad (52)$$

즉, 회전자를 Δt 시간마다 $\Delta\theta$ 만큼 이동시키면서 쇄교자속량을 각각 계산하여 위 식을 이용하여 구한다. 또한 선간전압은 Y-결선일 때 상전압간의 차이로 다음과 같이 구

할 수 있다.

$$V_{ab}(t) = V_a(t) - V_b(t) \quad (53)$$

80%의 목표성능 달성시 까지는 몇 번에 걸쳐 제작된 회전자에서 원하는 역기전력 파형 및 값을 얻기가 실제 무척 어려웠던 경험이 있었다. 그러나 유한요소 해석에 의해 회전자 구조 및 공극의 변화에 따라 선간 및 상에 유기되는 역기전력 파형 및 값을 해석할 수 있게 되었으며, 원하는 값에 근접시킬 수 있었다. 또한 해석된 역기전력 값으로부터 실제로 제작하여 착자되는 과정에서 생길 수 있는 자석의 B-H 곡선 값의 차이를 규명할 수 있었다. 해석에 의하여 구해진 25,000[rpm]에서의 역기전력 파형은 그림 4와 같다.

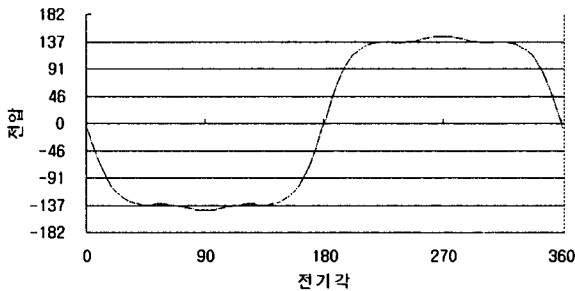


그림 4 상에 유기된 역기전력 해석 결과
Fig. 4 Analysis results of back EMF of phase

3.4 와전류 손실

도전율을 가지는 매질에 변압기 기전력이나 속도기전력에 의하여 와전류가 흐르게 되며, 이에 대한 전력소모가 있게 된다. 유한요소내의 와전류는 식(54)와 같이 계산되어 진다.

$$J_e^{(e)} = \sigma \frac{dA^{(e)}}{dt} \quad (54)$$

유한요소내의 와전류에 의한 단위길이당 소비전력[W/m]은 식(54)와 같이 계산되어 진다.

$$P^{(e)} = \frac{J_e^2}{\sigma} \cdot \Delta^e \quad (55)$$

여기서 Δ^e 는 요소의 면적이다.

표 2 구리밴드의 와전류손
Table 2 Eddy current loss of copper band

구리밴드 유무	웨이	티타늄 [W/m]	구리 [W/m]	자석 (SmCo) [W/m]	합계 [Watt/m]
없음	비자성	4412.3	-	56.1	4468.9
	자성 ($\mu r=3$)	2223.1	-	162.8	2385.9
있음	비자성	3801.8	1299.2	3.2	5104.2
	자성 ($\mu r=3$)	1883.6	691.7	4.6	2579.9

그러므로 와전류가 흐르는 도체내의 총 소비전력은 요소별 소비전력의 총합으로 식(56)과 같이 계산되어 진다.

$$P_{total} = \sum_{e=1}^n P^{(e)} \quad (56)$$

유한요소 해석에 의해 단위길이 당 소비전력[W/m]를 표 2와 같이 구하였다.

표 2에서 알 수 있듯이 구리밴드가 있을 때 자석에서 발생하는 소비전력이 큰 폭으로 감소하고 있음을 알 수 있고, 특히 자성웨지의 사용으로 와전류 손실을 크게 감소시킴을 알 수 있다.

4. 실험 결과

본 논문의 전동기는 표 3과 같은 사양을 갖고 있다.

표 3 전동기 주요 사양
Table 3 Specification of BLDCM

구분	설계 내용
회전수	25,000rpm
출력	100kW
공극	1.5mm
상수	7상
극수	6극
영구자석	SmCo
상당 역기전력	143V/25000rpm
선간 인덕턴스	108 μ H
상 저항	11m Ω
스위칭 소자	IGBT SKM 195 GB
IGBT 드라이버	SKHI 22A
극 위치 센서	자극 센서 방식
DSP	TMS320C31

실험 결과는 BLDCM 출력 향상을 위해 역기전력, 인덕턴스, 상전류등에 대해 개선 전/후의 실험결과 및 진상각을 고찰하였다.

4.1 개선 전의 실험 결과

표면부착형 브러시리스 전동기 개발 초기에는 영구자석이 고속회전 시 영구자석의 이탈문제 및 낮은 역기전력 등의 문제로 목표 출력의 65% 정도 실험을 수행하였다. 영구자석의 접착제 및 지지 방법의 개선 등으로 영구자석 이탈문제는 해결이 되었고, 착자 방법의 개선으로 낮은 역기전력 문제를 해결함으로써 목표 출력의 80% 정도 달성할 수 있었으나 다음과 같은 문제점들이 발견되었다[7][8].

○ 설계/제작품 역기전력 차이 : 입력전압이 일정하기 때문에 상 또는 선간 역기전력 크기가 일정해야 한다. 그러나 설계치와 값 차이는 최대출력 운전 시 속도지령에 대해 속도추종을 못하게 되었고 출력도 낮게 나왔다.

○ 낮은 인덕턴스로 상전류 불안정 : 낮은 인덕턴스는 상전류의 스위칭시 시간에 대한 전류의 기울기를 크게 하므로 일정한 크기의 상전류 파형을 만들지 못해 불균일한 토크를 만들었다.

○ 고속시 엔코더와 상전류 간의 불일치 : 엔코더 신호는 PWM 전압 파형의 시작과 끝이 일치하기 때문에 엔코더 신호와 상전류의 비교는 곧 역률에 대한 정보를 알 수 있게 한다. 속도에 따라서 엔코더 신호와 상전류간에 위상차로 인해 실제 전동기 출력에 부(-)의 토크가 걸려 총 출력이 떨어지게 되었다.

4.1.1 역기전력

역기전력의 설계치는 25000[rpm] 회전시 상당 143[V](선간 286[V])이다. 그러나 착자하는 방법, 착자기, 착자요크, 영구자석의 자화방향, 영구자석의 재료 등에 따라 역기전력이 120[V]~170[V] 정도로 변하게 되고 역기전력 파형이 달라지게 된다. 그림 5는 25000[rpm] 회전시 선간 유기전압이 328[V]가 측정 되었다. 이와 같은 경우는 착자기의 펄스전압 인가 시 과도한 에너지 전달로 인한 결과로 추정되고 있다.

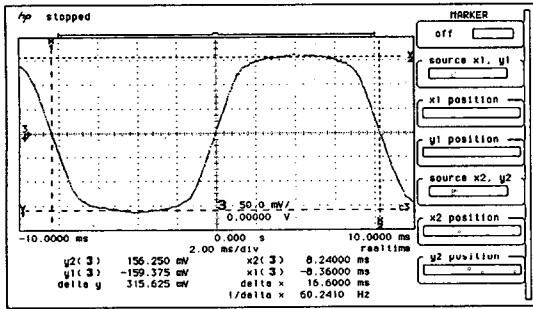


그림 5 역기전력(선간 유기전압 328V:점선기준)
Fig. 5 Back EMF(line induced voltage : 328V)

4.1.2 인덕턴스

본 연구에서 사용되고 있는 BLDCM의 인덕턴스의 사용 주파수는 식(56)과 같다.

$$f = \frac{n \times p}{120} = \frac{25000 \times 6}{120} = 1250[\text{Hz}] \quad (56)$$

선간 인덕턴스의 설계치가 1[kHz]~10[kHz]시 108[μH]이다. 주파수에 따른 측정된 전동기의 측정된 선간 인덕턴스 및 저항은 표 4와 같다.

표 4에서 선간 인덕턴스 값은 설계치 보다 낮아 80[kW] 부하시험 시 그림 6과 같이 상전류 파형이 인덕턴스가 적어 di/dt 기울기가 커져 전류제한이 되는 200[A] 이상으로 넘고 있다. 상전류의 피크전류가 많아 이는 곧 맥동 토크를 만들어 진동을 발생시키게 된다.

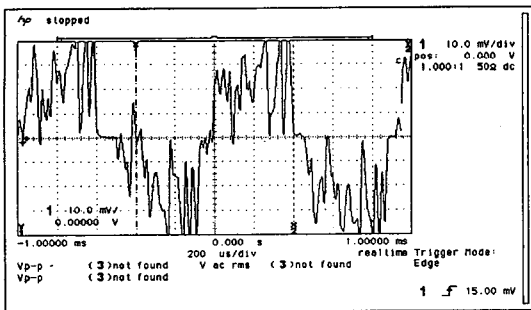


그림 6 상전류 파형(20,000[rpm], 65[kW])
Fig. 6 Waveform of phase current (20000[rpm], 65[kW])

표 4 측정된 선간 인덕턴스

Table 4 Measured line inductance

주파수(Hz)	전동기 + 리액터		전동기	
	L(μH)	R(Ω)	L(μH)	R(Ω)
100	121	35	74	-
400	100	50	76	-
1K	95	110	72	56
4K	80	400	58	312
10K	71	920	43	673

4.1.3 상전류

그림 7은 20000[rpm], 75[kW] 부하시험 시 나타난 결과로서 엔코더 셋팅에 대해 상전류가 동위상을 가져야 하나, 실제 결과에서는 60[μs] 만큼 지연되고 있다. 이는 속도에 따라 엔코더 셋팅에 대해 상전류가 동위상이 되지 않고 엔코더 셋팅이 속도의 함수로 작용하고 있음을 알 수 있다. 최대출력을 위해 100[kW]에서 최대속도시 엔코더 셋팅을 조절하여 상 역기전력에 대해 상전류가 동위상을 갖도록 하여야 한다.

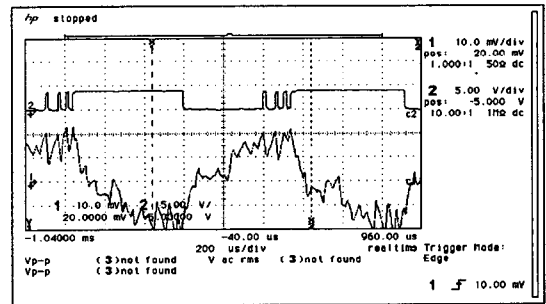


그림 7 엔코더에 대해 지연되는 상전류(20000[rpm])
Fig. 7 Lagged phase current to encoder (20,000[rpm])

4.2 개선 후의 실험 결과

4.2.1 역기전력

정속으로 회전시켜 측정된 역기전력 파형이 그림 8과 그림 9와 같다. 그림 8은 유기된 상전압이고, 그림 9는 유기된 선간전압이다. 그림 8에서 중앙 부분의 평평하지 않은 부분은 영구자석이 1극 당 3편으로 나누어져 있고, 자화방향은 경방향 자화(parallel magnetization)로 착자하여 그림 8과 같은 결과가 나왔다. 이는 그림 3의 해석된 역기전력과 거의 같음을 알 수 있다. 해석 결과 상전압이 137[V]인데 반해, 시험결과 상전압이 143[V]와의 차이는 축방향으로 고정자 코어가 회전자 영구자석 보다 길이가 더 길어 프린징 효과에 의해 약 6[V] 정도의 오차가 발생되었다고 판단된다. 그림 9의 선간전압 파형은 인접한 두 상전압을 측정된 것으로 2π/7의 전기적 위상차가 나는 인접한 두 상전압의 합성된 파형이다.

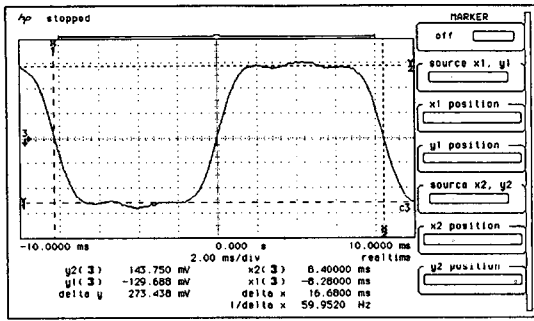


그림 8 상에 유기된 역기전력(143[V]/25000[rpm])
 Fig. 8 Back EMF induced from phase (143[V]/25000[rpm])

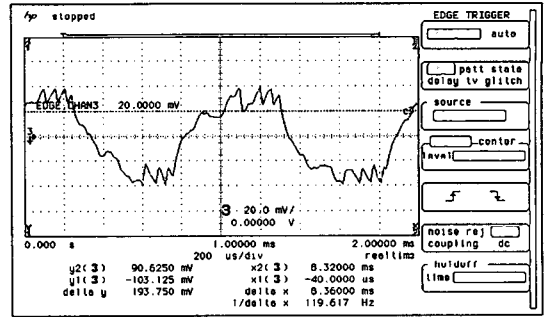


그림 10 기존 엔코더 셋팅시 상전류 파형
 Fig. 10 Waveform of phase current on encoder with unleading angle

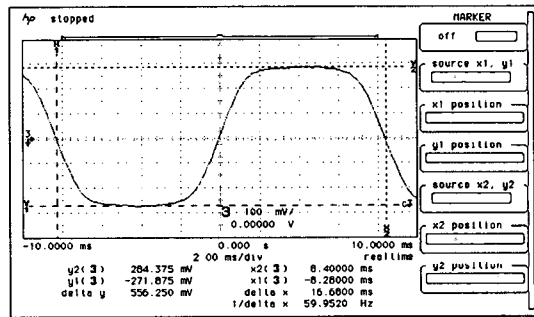


그림 9 선간에 유기된 역기전력(286[V]/25000[rpm])
 Fig. 9 Back EMF induced from line to line (286[V]/25000[rpm])

4.2.2 인덕턴스

인덕턴스를 개선하여 전동기의 측정된 선간 인덕턴스 및 저항은 표 5와 같다.

표 5 측정된 선간 인덕턴스
 Table 5 Measured line inductance

주파수(Hz)	전동기	
	L(μ H)	R(Ω)
100	125	45
400	112	62
1K	108	80
4K	107	174
10K	108	560

인덕턴스가 개선되어 약 110[μ H]에 대한 상전류는 그림 10과 같다

4.2.3 상전류

그림 10은 선간 인덕턴스가 110[μ H]인 본 연구의 BLDCM에 대한 상전류를 측정된 결과이다. 그림 6에서 설명하였듯이 상전류 파형이 PWM 상전압 파형과 동위상이 되지 않고 지연(lagging)된다. 따라서 상전류가 정상값에 도달하는 시간이 길어지므로 상전류 실효값이 작아진다. 결국 역기전력에 대한 상전류가 곱해지는 토크 값이 작아져서 출력저하의 원인이 되고 있다. 그림 11은 엔코더 신호를 역기전력 신호에 대해 앞 당겼을 때의 상전류 파형이다. 상전류가 정상값에 도달하는 시간이 그림 10에 비해 짧으며 상전류 실효값도 커졌으며 상전류 모양도 사각파에 가까워져 출력이 향상되고 있다[9].

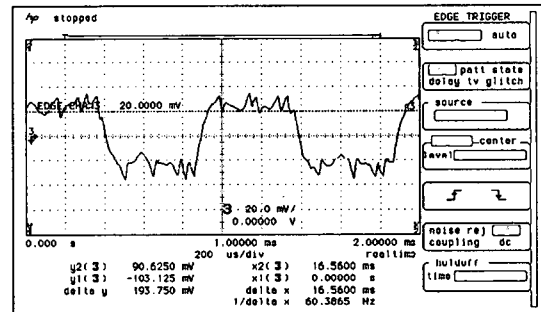


그림 11 엔코더 신호를 leading시 상전류 파형
 Fig. 11 Waveform of phase current on encoder with leading angle

4.2.4 전상각(phase-leading angle)

그림 12는 인덕턴스 변화, 전상각 변화에 따른 출력특성을 나타낸 그림이다. 전동기 회전수를 25,000[rpm]으로 회전하였을 때 출력을 측정하였다. 출력의 차이는 상전류 실효치에 대한 차이에 의한 것이다. 그림 12에서 L은 선간 인덕턴스를 나타내며, 단위는 [μ H]이다.

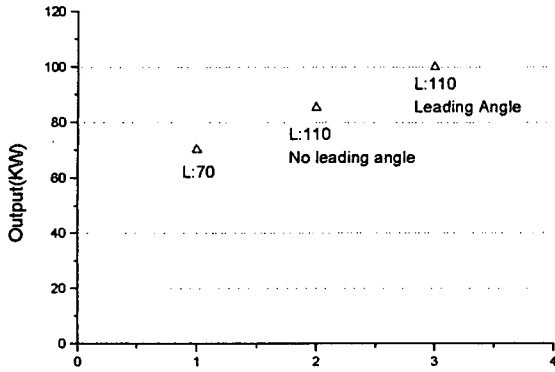


그림 12 부하시험 결과
Fig. 12 Result of load test

5. 결 론

본 연구에서는 고출력 브러시리스 직류전동기 개발을 위해 이론적으로 7상 6극 전동기에 대한 기자력식, 공극자속밀도, 합성자속 및 인덕턴스, 토크식을 고찰하였으며, 유한요소 해석으로 역기전력, 인덕턴스, 와전류손실 등을 분석하여 이를 토대로 하여 역기전력 크기 개선, 상전류 파형 개선, 자성웨이 적용 및 엔코더 진상각 적용 등을 통하여 7상 6극 고출력 브러시리스 직류전동기를 개발하였다. 이상의 내용으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

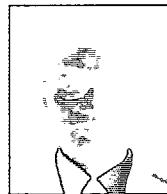
- 1) 해석된 역기전력이 실험 결과와 잘 일치함을 확인하였다.
 - 2) 선간 인덕턴스 값에 따라 상전류 파형의 차이를 확인할 수 있었으며, 자성웨이를 적용하여 개선된 인덕턴스로 상전류 파형을 개선하였다.
 - 3) 해석된 와전류손을 근거로 회전자에 발생열이 최소화 되는 구조로 하여 손실을 감소시켰다.
 - 4) 고속 운전시 엔코더 셋팅에 대한 상전류의 지연이 있음을 확인하였다. 엔코더 셋팅시 상전류에 대한 진상각(phase-leading angle)을 적용하여서 고속 회전에 대한 상전류 파형을 개선시켰다.
 - 5) 선간 인덕턴스와 엔코더 진상각에 대한 출력특성의 차이를 실험적으로 확인하였다.
- 추후 역기전력에 대한 엔코더 신호의 진상각에 대한 세부 특성을 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] Scherr, M. R., "Torpedo propulsion overview", Naval Forces, pp. 36-40, 1996.3.
 [2] Peter Mongeu, "High Torque/High Power Density Permanent Magnet Motors", Naval Symposium on Electric Machines, proceedings, July 28-31, 1997, The Hotel Viking, Newport, RI, U.S.A.
 [3] "Homing instincts", Jane's Navy International, pp. 25-34, November 1997.
 [4] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill Book Co., pp. 36-218,
 [5] Sheppard J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers,

pp. 1-16, 1995.
 [6] Sheppard J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, pp. 84-88, 1995.
 [7] 공영경 외 6명, "단시간 고출력 BLDC 전동기 개발", 추계학술대회 논문집, pp 43-45, 1998. 11
 [8] 공영경 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발(I)", 하계학술대회 논문집, pp 394-396, 1999. 7
 [9] 공영경 외 8명, "고출력 브러시리스 직류전동기 개발(II)", 추계학술대회 논문집, pp 67-69, 1999. 11

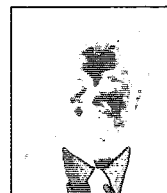
저 자 소 개



김 현 철 (金賢哲)
 1963년 5월 5일 생. 1989년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992~현재 국방과학연구소 선임연구원
 Tel : 0553-540-6143, Fax : 0553-542-3737
 E-mail : hckim@sunam.kreonet.re.kr



공 영 경 (孔泳卿)
 1956년 5월 1일 생. 1979년 홍익대 전기공학과 졸업. 1987년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 한국해양대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 국방과학연구소 책임연구원, 2체계본부 팀장
 Tel : 0553-540-6141, Fax : 0553-542-3737
 E-mail : ykkong@sunam.kreonet.re.kr



최 태 인 (崔泰仁)
 1950년 5월 29일 생. 1974년 서울대 응용물리학과 졸업. 1980년 University of Florida 전기공학과 졸업(석사). 1984년 University of Florida 전기공학과 졸업(공학). 현재 국방과학연구소 책임연구원, 2체계본부 2부장
 Tel : 0553-540-6141, Fax : 0553-542-3737



송 증 환 (宋鍾煥)
 1958년 7월 17일생. 1982년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학). 1994년~현재 효성중공업(주) 근무.
 Tel : 02-3487-0001, Fax : 02-3487-0303
 E-mail : songjw@pop3.hyosung.co.kr